Vol.13, No.2, Summer 2024, pp.22-44 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

دانشگاه فردوسی مشهد
Ferdowsi University of Mashhad

RESEARCH ARTICLE **DOI: 10.22067/geoeh.2023.82213.1360** **Open access**

Estimation of Sheet Erosion by Dendrogeomorphology Method

Zahra Younesian[a], Adel Sepehr[*b], Seyed Reza Hosseinzadeh[c]

[a] *Phd student of Geomorphology, Faculty of Geology, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*
[b] *Associate Professor of Geomorphology, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*
[c] *Professor of Geomorphology, Department of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*

Received: 4 May 2023 ***Revised: 27 June 2023*** ***Accepted: 3 July 2023***

Abstract

Erosion is the main factor in the process of land degradation, which has left significant effects in many ecosystems of the world during different eras. 75% of Iran's lands are subject to erosion, and the Darbadam catchment in northeast of Iran is no exception.

In this research, dendrogeomorphology technique has been used on the exposed roots of juniper trees with the aim of estimating sheet erosion rate. Using selective sampling method, 28disc samples were done from the roots of juniper trees. Then, by macroscopic and microscopic analysis of the roots in the laboratory, the exact year of root exposed from the soil due to sheet erosion was determined. In the macroscopic analysis, the index of sudden changes in the width of the growth ring, and in the microscopic analysis, the indicators of the changes in the size, number and orientation of the vessels, the size of the lumen of the cells and the size of the fibers were measured indicating the exposed of the roots from the soil.

The results showed that the annual erosion rate is less than 1 mm per year. The average annual erosion rate in trees less than 50 years old is 0.52 mm and for trees between 50 and 100 years old it is 0.33 mm which shows the positive effect of tree roots in soil protection. The highest annual erosion rate was recorded in pastures with poor coverage and the lowest rate in forests with low canopy cover. These results showed that there is a positive relationship between the degree of slope and the amount of sheet erosion. Finally, it was found that the technique of dendrogeomorphology is a suitable, low-cost and easy method for estimating the erosion rate in areas with juniper tree species.

Keywords: Sheet Erosion, Dendrogeomorphology, Dendrocornology, Darongar basin, Tree root dating, Northeastren of Iran.

---

[*]. Corresponding author: Adel Sepehr Email: adelsepehr@um.ac.ir Tel:+989155085732

How to cite this Article: Younesian, Z., Sepehr, A., & Hosseinzadeh, R.(2024). Estimation of sheet Erosion by dendrogeomorphology Method .*Journal of Geography and Environmental Hazards*, *13*(2),22-44

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۳، ص ٤٤-۲۲

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/geoeh.2023.82213.1360

دسترسی آزاد

ارزیابی نرخ فرسایش ورقه‌ای با استفاده از دندروژئومورفولوژی (مطالعه موردی: دربادام قوچان)

زهرا یونسیان – دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

عادل سپهر[1] – دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

سید رضا حسین‌زاده– استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت:۱٤۰۲/۲/۱٤ تاریخ بازنگری:۱٤۰۲/٤/٦ تاریخ پذیرش:۱٤۰۲/٤/۱۲

چکیده

فرسایش خاک، عامل اصلی روند تخریب زمین است که طی دوران‌های مختلف، در بسیاری از اکوسیستم‌های جهان اثرات قابل‌توجهی را بر جای گذاشته است. ۷۵ درصد اراضی ایران در معرض فرسایش قرار دارد که حوضه آبریز دربادام در شمال‌شرق ایران نیز از این قاعده مستثنی نیست. در این پژوهش با هدف برآورد نرخ فرسایش ورقه‌ای از تکنیک دندروژئومورفولوژی بر روی ریشه‌های بیرون زده درختان ارس استفاده شده است. با استفاده از روش نمونه‌برداری انتخابی تعداد ۲۸ نمونه دیسکی از ریشه درختان ارس برداشته شد. سپس با آنالیز ماکروسکوپی و میکروسکوپی ریشه‌ها در آزمایشگاه به‌طور دقیق سال بیرون‌زدگی ریشه از خاک بر اثر فرسایش ورقه‌ای مشخص شد. در آنالیز ماکروسکوپی شاخص تغییرات ناگهانی در عرض حلقه رشد و در آنالیز میکروسکوپی شاخص‌های تغییرات اندازه، تعداد و جهت‌گیری آوندها، اندازه لومن سلول‌ها و اندازه فیبرها اندازه‌گیری نشان از بیرون‌زدگی ریشه از خاک داشتند. نتایج نشان داد میزان فرسایش سالیانه کمتر از ۰/۱ میلی‌متر در سال بوده و میانگین فرسایش سالیانه در نمونه‌های تهیه شده از درختان با سن کم‌تر از ۵۰ سال ۰/۵۲ میلی‌متر و برای درختان با عمر بین ۵۰ تا ۱۰۰ سال ۰/۳۳ میلی‌متر است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت ریشه‌های درختان در نگهداشت خاک دارد. بیش‌ترین نرخ فرسایش سالانه در مراتع با پوشش فقیر و کم‌ترین میزان در جنگل با تاج پوشش کم ثبت شد. هم‌چنین نتایج نشان داد میان درجه شیب و

[1]. نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۵۰۸۵۷۳۲ Email: adelsepehr@um.ac.ir

میزان فرسایش ورقه‌ای رابطه مثبت وجود دارد. درنهایت مشخص شد تکنیک دندروژئومورفولوژی روشی مناسب، کم‌هزینه و آسان برای برآورد نرخ فرسایش در مناطق دارای گونه درختی ارس است.

کلیدواژه‌ها: فرسایش ورقه‌ای خاک، دندروژئومورفولوژی، گاه‌شناسی درختی، سن سنجی، ریشه های درخت، شمالشرق ایران، حوضه آبریز رودخانه درونگر

۱- مقدمه

خاک یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی در جهان محسوب می‌شود و به‌طور گسترده‌ای برای تأمین نیازهای بشر مورداستفاده قرار می‌گیرد. به دلیل فرآیند طولانی شکل‌گیری، خاک به‌عنوان یک منبع تجدیدناپذیر در نظر گرفته می‌شود؛ در نتیجه باید برای جلوگیری از تخریب و هدر رفت آن به‌درستی مدیریت شود (Lal,2009). فرسایش خاک عامل اصلی روند تخریب زمین است که طی دوران‌های مختلف، در بسیاری از اکوسیستم‌های جهان اثرات قابل‌توجهی را بر جای گذاشته است(Poesen,2018; Lal,2001). اگرچه فرایندهای فرسایشی در طول تاریخ وجود داشته است، اما این روند در طول قرن بیست و یکم با افزایش جمعیت و نیازهای روزافزون بشری شدت یافته است(Pimentel et al, 1995). این تخریب‌ها منجر به ایجاد تغییرات آب و هوایی، کاهش توانایی باروری خاک به‌ویژه در سرزمین‌های خشک و نیمه‌خشک می‌شود.(Lal,2001) ایران در حال حاضر با مشکلات زیادی در رابطه با فرسایش خاک مواجه است، بخش وسیعی از اراضی کشور را محیط‌های آسیب‌پذیر به خطر بیابانی شدن احاطه کرده‌اند، به‌طوری‌که ۷۵ درصد اراضی ایران در معرض فرسایش قرار دارد(Sepehr, 2014). ایران به‌طور سالانه، ۱۲ تن فرسایش خاک دارد و در سال ۱۳۹٦ فرسایش خاک ٥٦ میلیارد دلار به ایران خسارت زد. ایران در حال حاضر دارای یکی از بالاترین نرخ‌های فرسایش در جهان است و ۹۰ درصد سطح کشور تحت تأثیر انواع فرسایش قرار دارد (Ahmadi,2008).

یکی از روش‌هایی که از دهه ۱۹۶۰ برای محاسبه فرسایش خاک رایج گردیده، روش دندروژئومورفولوژی است(Lawler,2005). دندروژئومورفولوژی [1] بر اساس تعیین تأثیر فرآیندهای ژئومورفولوژیکی بنا شده است که بر پویایی رشد درخت تأثیر می‌گذارد. این روش با مطالعه تغییرات در شاخص‌های کالبدی مانند الگوهای رشد سالانه و آناتومی حلقه‌های رشد، نظم متحدالمرکز مقطع ساقه و ریشه، سرعت رشد و آناتومی چوب (به‌عنوان‌مثال تعداد سلول در هر حلقه، قطر سلول‌های اولیه چوب) اطلاعات موردنیاز در مورد شروع و شدت فرسایش را ارائه می‌دهد(Hitz, Gärtner, Heinrich & Monbaron, 2008). توصیف تغییرات آناتومیکی در یک حلقه رشد می‌تواند شروع قرار گرفتن ریشه در معرض هوا را نشان دهد. از این اطلاعات، می‌توان میزان تلفات خاک (تا تاریخ برداشت ریشه) را نتیجه گرفت(Lawler,2005) . به گفته Gärtner, Schweingruber & Dikau,(2001)، تغییرات آناتومیکی حلقه‌های رشد مربوط به اثرات قرار گرفتن ریشه در معرض جو است، تغییرات دما، کاهش فشار پوشش خاک در معرض نور قرار گرفتن، همچنین افزایش تخریب پوشش الیافی منجر به ایجاد تنش مکانیکی در ریشه خواهد شد.

مزیت دندروژئومورفولوژی در مقایسه با سایر روش‌های معمول اندازه‌گیری فرسایش خاک، این است که نرخ فرسایش را می‌توان سالانه با نرخ متوسط و همچنین برای رویدادهای منفرد، به‌صورت کمی برآورد کرد (Ballesteros-Cánovas et al.,2013). همچنین دندروژئومورفولوژی می‌تواند برای تکمیل رویکردهای متدولوژیکی و یا به‌تنهایی برای تخمین میزان فرسایش به‌ویژه برای مناطقی که اندازه‌گیری‌های سیستماتیک ندارد، به کار برده شود.

روابط متقابل میان سنگ‌بستر، توپوگرافی، خاک و پوشش گیاهی نشان‌دهنده یک پاسخ هیدرولوژیکی و فرسایشی مشترک در هر اکوسیستم است (Gyssels, Poesen, Bochet & Li, 2005) . درک فرآیندها با پیوند دادن واحد پاسخ فرسایش هیدرولوژیک و دندروژئومورفولوژی می‌تواند به گسترش دانش به دست آمده در منطقه موردمطالعه به دیگران کمک کند. Gärtner (2007) معادله تصحیح شده‌ای را برای تخمین میزان فرسایش ارائه داد که در آن ارتفاع خاک فرسایش یافته به فرآیند فرسایش و رشد مداوم ریشه ثانویه بستگی دارد.

---

[1] Dendrogeomorphology

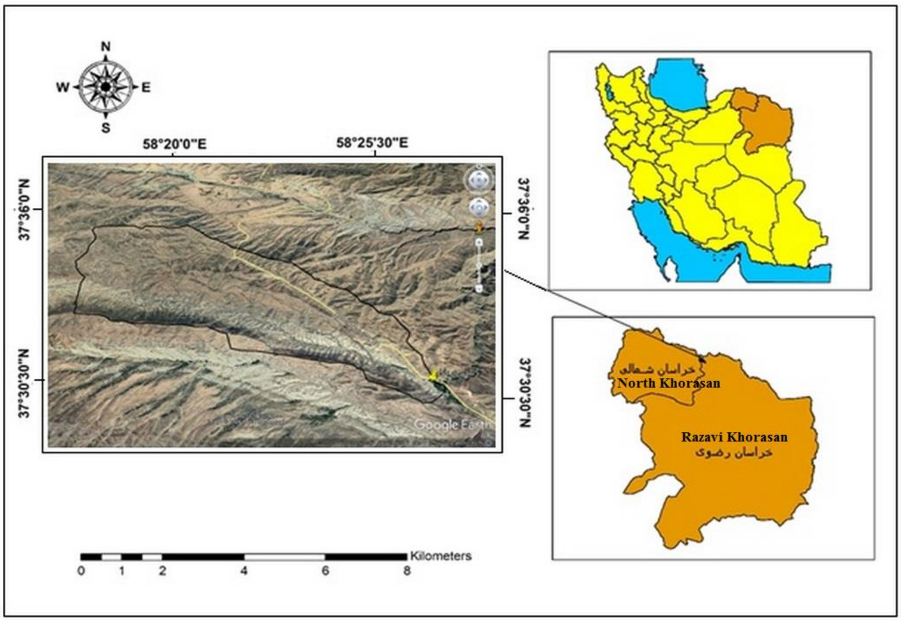
در برآورد میزان فرسایش ورقه‌ای به روش دندروژئومورفولوژیکی تمامی حلقه‌های رشد تا زمانی که بر اثر فرسایش در سطح زمین نمایان شوند، به‌صورت متحدالمرکز بوده‌اند. پس از آن رشد حلقه‌ها از حالت متحدالمرکز بودن خارج شده و عموماً به‌صورت بیضی مانند رشد می‌کند. بین ساختار چوب ساقه و چوب ریشه تفاوت وجود دارد. هنگامی‌که ریشه درخت از خاک خارج شده و در معرض هوای آزاد قرار می‌گیرد، ساختار آناتومیک آن دستخوش تغییر شده و خصوصیات چوب ساقه را پیدا می‌کند، از همین رو می‌توان با مطالعه ریشه بیرون زده، سال شروع فرسایش را تعیین نمود. اولین حلقه رشدی که از حالت طبیعی خود خارج شده باشد نمایانگر سال برون‌زدگی ریشه و آغاز روند فرسایشی است. تعداد حلقه‌های نامتقارن نشانگر سال‌هایی است که ریشه در معرض هوا قرارگرفته است (Stottes, O'Neal, Pizzuto & Hupp,2014). بیش‌تر تحقیقات انجام شده تاکنون بر روی تعیین دقیق اولین سال مواجهه با فرسایش متمرکز بوده است؛ بنابراین، تغییرات ریشه ناشی از قرار گرفتن در معرض در سطح ماکروسکوپی(Carrara & Carroll, 1979) یا در سطح بافت و سلول تجزیه‌وتحلیل شده است (Fayle, 1968; Gärtner, Schweingruber & Dikau, 2001 ; Hitz, Gärtner, Heinrich & Monbaron, 2008).

پژوهش‌های دندروژئومورفولوژی در ایران بسیار محدود است(Bahrami, Tazari, & Parsiani, 2018) . (Bahrami, Tazari, & Parsiani, 2011) به بررسی فرسایش ورقه‌ای در حوضه قره‌چای با استفاده از روش دندروژئوموفیک پرداختند و به نتیجه رسیدند که گونه‌های سوزنی‌برگ مانند سرخدار و زربین، به علت دارا بودن حلقه‌های واضح‌تر و قابل‌شمارش‌تر، دارای کارایی بهتری در برآورد میزان فرسایش در منطقه موردمطالعه هستند. با توجه به افزایش نرخ فرسایش در ایران انجام این مطالعات ضروری خواهد بود. مطالعه حاضر بر روی تجزیه‌وتحلیل تغییرات آناتومیکی چوب در حلقه‌های رشد سالانه ریشه‌های درخت ارس ناشی از قرار گرفتن در معرض فرایند فرسایش ورقه‌ای تمرکز دارد و به بررسی امکان تعیین و قدمت تغییرات آناتومیکی، تخمین نرخ فرسایش و تعیین زمان نسبی آغاز فرسایش می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه حوضه آبریز رودخانه دربادام از زیر حوضه‌های مهم حوضه آبریز رودخانه درونگر، واقع در شمال استان خراسان رضوی و در موقعیت جغرافیایی ۳۷ درجه ۲۹ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۸ درجه ۲٦ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. حوضه موردمطالعه در مرز دو استان خراسان رضوی و خراسان شمالی واقع شده است. بلندترین و پست‌ترین نقطه حوزه به ترتیب ۲٦۲۳ و ۱۵۲۳ از سطح دریا ارتفاع دارد. نوع اقلیم آن نیمه مرطوب و سرد کوهستانی است و مقدار بارش از ۳۵۰ تا ٤۵۰ میلی‌متر در سال نوسان داشته، هم‌چنین کمینه دما در زمستان ۱۹- درجه سانتی‌گراد و بیشینه درجه حرارت در فصل گرم تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. گونه درختی غالب منطقه درخت ارس است. این حوزه از لحاظ زمین‌شناسی در ناحیه ساختاری کپه داغ واقع گردیده است. در شکل(۱) موقعیت منطقه موردمطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه موردمطالعه

Fig.1. study area location

روش مطالعه در این مقاله دارای تنوع تاریخی- تجربی و مبتنی بر تکنیک دندروژئومورفولوژی و تاریخ‌نگاری پدیده فرسایش ورقه‌ای است. قبل از عملیات میدانی، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۵۰۰۰۰

:۱، زمین‌شناسی ۲۵۰۰۰۰ :۱ و مدل رقومی ارتفاع نوع ASTER و به کمک نرم افزار ArcGIS اقدام به تهیه نقشه‌های پایه شده است. سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، سه سایت نمونه‌برداری در دو زیر حوضه مجاور یکدیگر که از نظر ویژگی توپوگرافی، رسوب‌شناسی و گیاه‌شناسی متفاوت بوده‌اند، انتخاب شد. تعداد ۲۸ نمونه از ریشه‌های بیرون زده درختان در این سه سایت برداشت شد.

نمونه‌برداری در پاییز ۱۳۹۹ صورت پذیرفت. هنگام نمونه‌برداری برای هر درخت، شناسنامه‌ای تهیه شد که شامل اطلاعاتی مانند ارتفاع درخت از سطح دریا، شیب، جهت شیب، محل تماس ریشه با سطح خاک، فاصله سطح خاک تا سطح فوقانی ریشه برای هر نمونه است. تمامی نمونه‌ها توسط اره از ریشه‌ها جدا شده و به آزمایشگاه منتقل گردید.

۲-۲- آنالیزهای آزمایشگاهی و آماری

در آزمایشگاه هر نمونه به دو قسمت تقسیم شد. یک قسمت برای آنالیز میکروسکوبی (بزرگنمایی ۲۰ تا ۱۰۰ برابر بزرگ‌تر از اندازه واقعی) در محلول فیکساتور قرار گرفت و یک قسمت دیگر جهت آنالیز ماکروسکوپی (بزرگنمایی تا ۲۰ برابر بزرگ‌تر از اندازه واقعی) به مدت ۱ ماه در هوای معمولی خشک شد.

نمونه‌های آنالیز ماکروسکوپی بعد از خشک شدن با استفاده از سمباده‌های با درجات زبری مختلف صاف و صیقلی شدند به‌نحوی‌که حلقه‌های رویشی قابل‌ملاحظه و تشخیص باشد (شکل شماره ۲). سپس با استفاده از دستگاه LiNTAB6 و نرم‌افزار TSAPWIN متصل به آن تعداد حلقه‌های رشد و عرض این حلقه‌ها اندازه‌گیری شد. با استفاده از دستگاه میکروتوم از نمونه‌های تهیه شده برای آنالیز میکروسکوپی برش‌های بسیار نازک به اندازه ۱۵ تا ۲۰ میکرون تهیه شد. برای وضوح آوندهای و سایر سلول‌های بافت گیاهی، برش‌های نازک تهیه شده با میکروتوم با استفاده از محلول سافرانین رنگ‌آمیزی شد سپس روی لام میکروسکوپی قرار گرفت (شکل ۲). در ادامه نمونه‌ها زیر میکروسکوپ نوری عکس‌برداری شد. سپس برای هر حلقه رشد متوسط اندازه آوندها و تراکم آوندها با استفاده از نرم‌افزار Digimizer محاسبه شد.

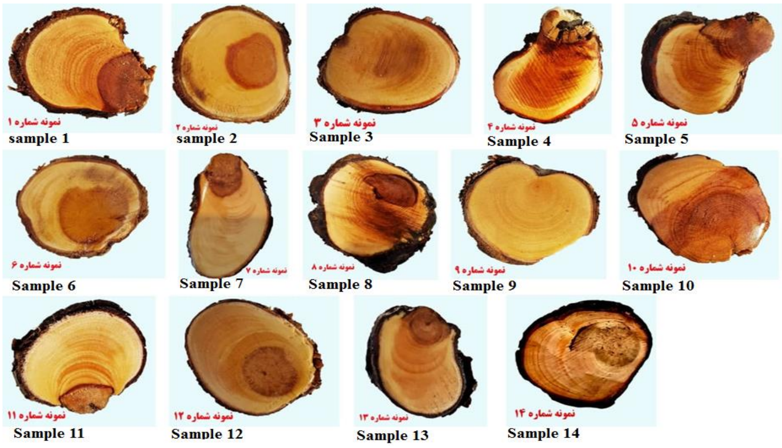


شکل ۲- ۱ و ۲ نحوه نمونه‌برداری از ریشه‌های بیرون زده، ۳، ٤، ۵ و ٦ رنگ‌آمیزی و آماده‌سازی نمونه‌ها برای مطالعه گاه شناسی درختی.

Fig.2. 1, 2: Sampling of exposed tree roots; 3, 4, 5 and 6: Staining and preparation of samples for tree ring analysis and dating.

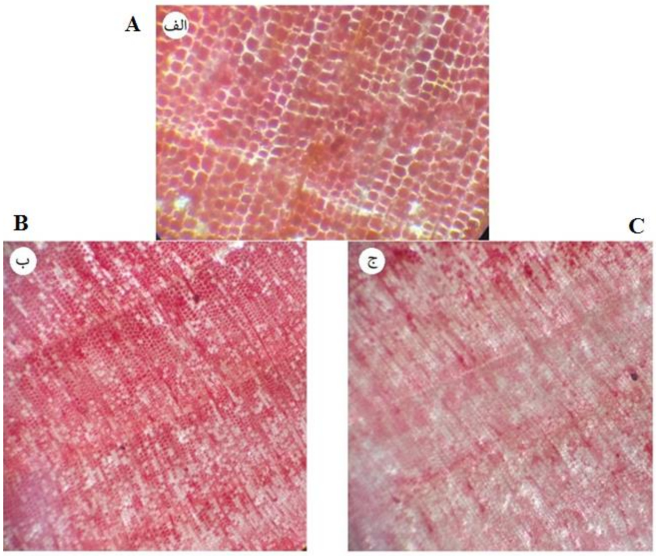
در ادامه با استفاده از شاخص‌هایی که نشان از بیرون‌زدگی ریشه درخت از خاک دارند اولین سال بیرون‌زدگی ریشه از خاک تعیین شد.

از شاخص‌های ماکروسکوپی که نشان از بیرون‌زدگی ریشه دارند دو شاخص انحراف از مرکز حلقه رشد و افزایش یا کاهش ناگهانی عرض حلقه رشد در نمونه‌ها قابل‌ملاحظه بود. در تصویر شماره ۳ نمونه‌های تهیه شده برای آنالیز ماکروسکوپی قابل‌ملاحظه است. از شاخص‌های میکروسکوپی نشان‌دهنده بیرون‌زدگی ریشه از خاک دو شاخص کاهش یا افزایش ناگهانی اندازه متوسط سلول‌های آوند در یک حلقه رشد و افزایش و کاهش ناگهانی در تراکم آوندهای یک حلقه رشد قابل‌مشاهده بود. در تصویر شماره ٤ عکس نمونه‌های تهیه شده برای آنالیز میکروسکوپی زیر میکروسکوپ نوری قابل‌ملاحظه است.



شکل ۳- مقاطع نمونه‌برداری شده از درخت ارس در حوضه آبریز دربادام برای آنالیز ماکروسکوپی

Fig.3. Cross-sections of sampled Juniper trees in the Darbadam watershed for macroscopic analysis.



شکل ٤- مطالعه حلقه‌های رویشی با میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ۳۰. در تصویر الف که قبل از برون‌زدگی ریشه است سلول‌های آوندی نظم معینی داشته در تصویر ب و ج که بعد از برون‌زدگی گرفته شده است نظم، تراکم و اندازه سلول‌ها از بین رفته است.

Fig.4. Study of growth rings using a light microscope at 30x magnification. In image A, taken before root emergence, the vascular cells exhibit a specific arrangement. In images B and C, taken after root emergence, the arrangement, density, and size of the cells have deteriorated.

بعد از تعیین نخستین سال رخنمون ریشه‌ها با توجه به الگوی حلقه‌های رویشی بر اساس روش گارتنر (۲۰۰۷) (معادله (۱)) مقدار کلی فرسایش به میلی‌متر(Er) به دست آمد.

در ادامه نرخ فرسایش سالیانه به میلی‌متر(Era) با استفاده از معادله (۲) محاسبه شده و درنهایت بر اساس معادلات مذکور، میانگین سالانه فرسایش ورقه‌ای برای هر نمونه محاسبه شد.

$$Er = R2 + [\frac{(B1+B2)}{2}] - R1 + Ex$$ معادله (۱)

Eq.1.

در این معادله R1: قطر ریشه (میلی‌متر) که پوست آن را هم در بر می‌گیرد، Ex: فاصله بین بخش رویی ریشه و سطح فعلی خاک بر حسب میلی‌متر، R_2: ارتفاع ریشه در زمان رخنمون، بر پایه تجزیه‌وتحلیل تغییرات کالبدشناختی، B_1: ضخامت پوست بخش رویی ریشه بر حسب میلی‌متر، B_2: ضخامت پوست بخش پایینی ریشه (میلی‌متر).

$$Era = \frac{Er}{2NRex}$$ معادله (۲)

Eq.2.

در این معادله نرخ فرسایش سالیانه به میلی‌متر(Era) از تقسیم Er به دست آمده از معادله (۱) بر تعداد حلقه‌های رشدی که بعد از سال رخنمون رشد کرده‌اند (NRex) به دست می‌آید.

۳- نتایج و بحث

جدول شماره ۱ نتایج مربوط به برآورد نرخ فرسایش، پوشش گیاهی، شیب و نوع سازند زمین‌شناسی مربوط به درختان نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد.

کلیه مقاطع تهیه شده از ریشه درختان ارس بوده است. پراکنش نقاط نمونه‌برداری شده بر روی نقشه کاربری اراضی و نقشه زمین‌شناسی منطقه در شکل شماره ۵ قابل‌مشاهده است.

منطقه موردمطالعه شامل واحدهای اراضی باغی، جنگل با تاج پوشش کم، مراتع با پوشش خوب، مرتع با پوشش متوسط، مرتع با پوشش ضعیف، بیشه‌زار و بوته‌زار است. از مجموع ۲۸ نمونه تهیه شده، ۱۰ نمونه‌هایی از اراضی مرتعی با پوشش فقیر، ۱٦ نمونه از اراضی مرتعی با پوشش متوسط و دو نمونه نیز از جنگل با تاج‌پوشش کم تهیه شده است.

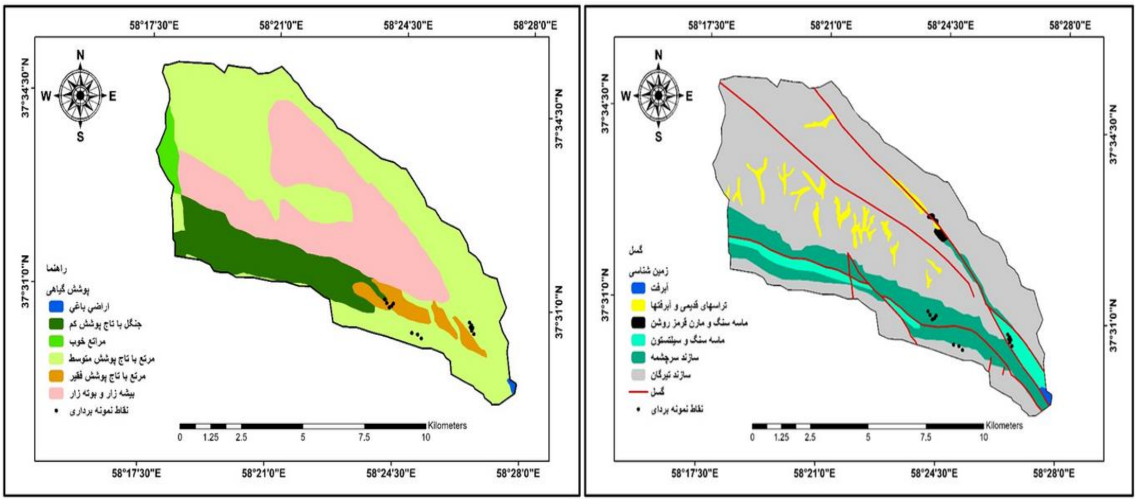
جدول ۱- نتایج مربوط به برآورد نرخ سالانه فرسایش در منطقه موردمطالعه

Table1- Results of Annual Erosion Rate Estimation in the Study Area

E و a **(mm/y)**	**Er** **(mm)**	**شیب (درجه)** **Slope**	**سن درخت** **Tree Age**	**نوع سازند زمین‌شناسی زیربنا** **Geological Formation of the Substrate**	**نوع پوشش گیاهی** **Type of vegetation**		شماره نمونه Num
0.79	19	13	41	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	1
0.63	19	21	21	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	2
0.03	2	7	52	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	جنگل با تاج پوشش کم Low Canopy Forest	میکروسکوپی Microscopic	3
0.36	11	9	53	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	4
0.38	5.8	12	41	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	5
0.65	19	21	21	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	6
0.3	22	9	93	سازند تیرگان Tirgan Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	7
0.26	16	7	82	سازند تیرگان Tirgan Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	8
0.47	19	12	41	سازند تیرگان Tirgan Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	9

0.37	9	10	91	سازند سرچشمه Sarcheshmeh Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	10
0.3	4	10	45	سازند سرچشمه Sarcheshmeh Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	11
0.41	13	12	33	سازند سرچشمه Sarcheshmeh Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	12
0.27	6	8	53	سازند سرچشمه Sarcheshmeh Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	میکروسکوپی Microscopic	13
0.28	5.1	11	39	سازند سرچشمه Sarcheshmeh Formation	جنگل با تاج پوشش کم Low Canopy Forest	میکروسکوپی Microscopic	14
0.70	17	13	41	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	ماکروسکوپی Macroscopic	15
0.66	20.1	21	21	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	ماکروسکوپی Macroscopic	16
0.75	5	7	52	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	ماکروسکوپی Macroscopic	17
0.50	15	18	21	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	ماکروسکوپی Macroscopic	18
0.26	4	8	41	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	ماکروسکوپی Macroscopic	19
0.79	19	12	23	ماسه‌سنگ و سیلتستون Sandstone & Siltstone	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	ماکروسکوپی Macroscopic	20
0.34	20	8	93	سازند تیرگان Tirgan Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	ماکروسکوپی Macroscopic	21
0.32	20	10	82	سازند تیرگان Tirgan Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	ماکروسکوپی Macroscopic	22
0.50	20	18	41	سازند تیرگان Tirgan Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	ماکروسکوپی Macroscopic	23
0.41	10	10	33	سازند سرچشمه Sarcheshmeh Formation	مرتع با تاج پوشش متوسط Moderate Canopy Cover Pasture	ماکروسکوپی Macroscopic	24

25	ماکروسکوپی Macroscopic	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	سازند سرچشمه Sarcheshmeh Formation	33	7	6.7	0.51
26	ماکروسکوپی Macroscopic	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	سازند سرچشمه Sarcheshmeh Formation	45	12	15	0.48
27	ماکروسکوپی Macroscopic	مرتع با تاج پوشش فقیر Poor Canopy Cover Pasture	سازند سرچشمه Sarcheshmeh Formation	39	11	8.2	0.74



شکل ۵- پراکنش نقاط نمونه‌برداری شده بر نقشه کاربری اراضی و زمین‌شناسی در حوضه آبریز دربادام

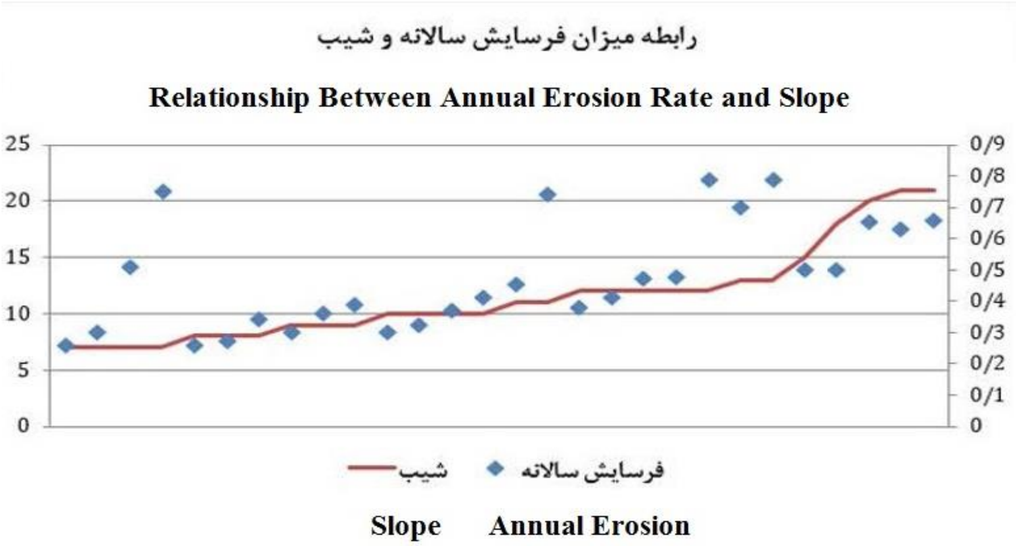
Fig.5. Distribution of Sampled Points on the Land Use and Geology Map in the Dababdam Watershed

بعد از محاسبه نرخ فرسایش سالانه برای هر نمونه ضمن تشریح نتایج به‌دست‌آمده به بررسی این نتایج پرداخته می‌شود.

با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات میدانی و بررسی‌های آزمایشگاهی که در جدول (۱) آمده است مشخص شد در تمامی مقاطع نمونه‌برداری شده نرخ فرسایش سالانه کم‌تر از یک میلی‌متر است.

رابطه میان شیب محل برداشت نمونه و میزان فرسایش سالانه در شکل (٦) ارائه شده است. با توجه به نمودار مشخص شد رابطه معناداری بین میزان افزایش شیب و میزان فرسایش سالانه در محل‌های

نمونه‌برداری وجود دارد. با افزایش درجه شیب، میزان فرسایش سالانه در محل نمونه‌برداری افزایش یافته است. برای بررسی تأثیر مقدار شیب بر میزان فرسایش از آزمون آماری تحلیل واریانس ANOVA استفاده شد. نتایج نشان داد میزان شیب بر میانگین نرخ فرسایش سطحی سالانه با مقدار p- value برابر با ۰/۰۵ تأثیرگذار است. بدین معنی که تأثیر شیب بر میانگین سالانه نرخ فرسایش در حوضه موردمطالعه به میزانی است که بتوان آن را به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار بر نرخ فرسایش در نظر گرفت.



شکل ٦- رابطه بین شیب محل برداشت نمونه ریشه و نرخ فرسایش سالانه

Fig.6. Relationship Between the Slope of the Sampling Location and the Annual Erosion Rate

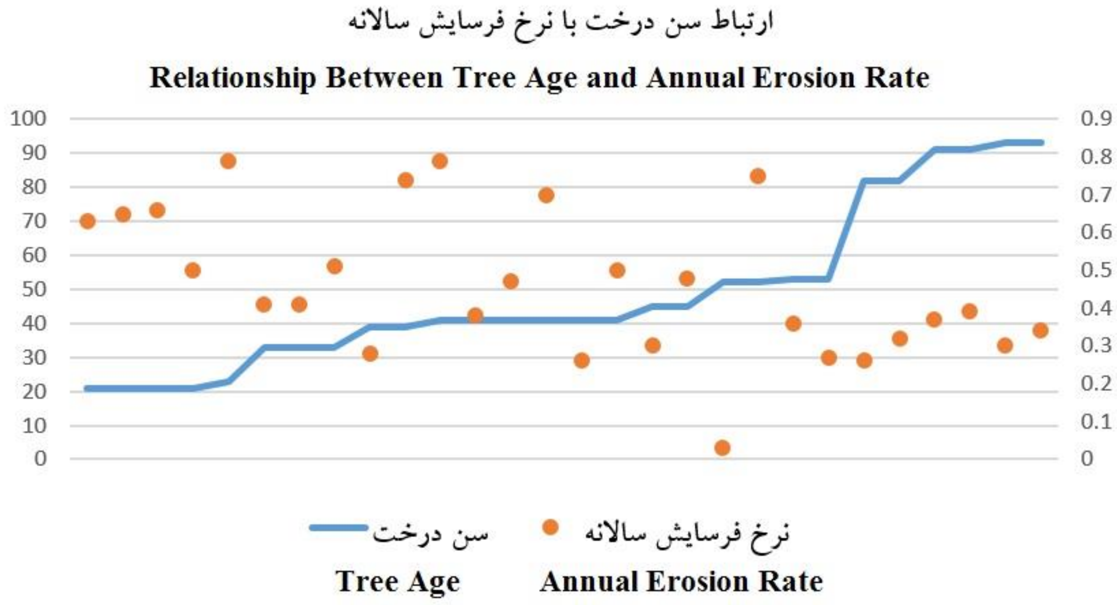


Fig.7. Relationship Between the Age of Sampled Trees and the Annual Erosion Rate

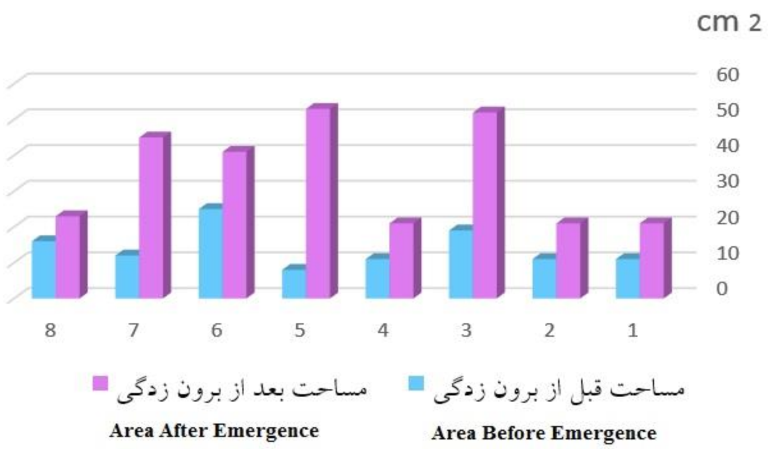
در ادامه رابطه میان میانگین فرسایش سالانه با سن نمونه‌های برداشت شده موردبررسی قرار گرفت. برای مقاطع عرضی برداشت شده که کم‌تر از ۵۰ سال سن دارند فرسایش سالانه ۰/۵۲ میلی‌متر و برای مقاطع دارای سن ۵۰ تا ۱۰۰ سال ۰/۳۳ میلی‌متر است . درنهایت مشخص شد نقاطی که سن درختان نمونه‌برداری شده کم‌تر است، میانگین فرسایش سالانه بیش‌تری دارند. در شکل (۷) رابطه بین سن مقاطع و میزان فرسایش سالیانه برای نمونه‌های برداشت شده نشان داده شده است که یک رابطه خطی از نوع معکوس را نشان می‌دهد. در واقع با کاهش سن نمونه‌ها میزان فرسایش افزایش می‌یابد و فرسایش دارای روند افزایشی است.

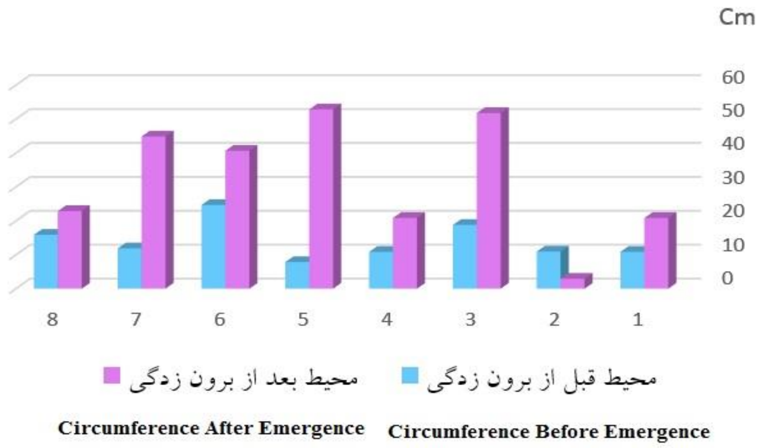
انطباق نقاط نمونه‌برداری شده با نقشه کاربری اراضی نشان می‌دهد که متوسط فرسایش سالانه در جنگل با تاج پوشش کم ۰/۱۵ میلی‌متر در سال، در مرتع با پوشش متوسط ۰/۳۵ میلی‌متر در سال و در مرتع با پوشش فقیر ۰/٦٥ میلی‌متر در سال است. بیش‌ترین فرسایش سالانه در مناطق با پوشش مرتعی فقیر و کم‌ترین فرسایش سالانه در کاربری جنگل صورت می‌پذیرد.

با توجه به نتایج به دست آمده از رابطه میزان فرسایش خاک و کاربری اراضی و هم‌چنین رابطه میان میزان فرسایش خاک و سن درختان، اهمیت تأثیر نوع پوشش و کاربری زمین و نقش ریشه درختان در محافظت از خاک و جلوگیری از هدررفت خاک در منطقه موردمطالعه به‌وضوح قابل‌ملاحظه است.

یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از تکنیک دندروژئومورفولوژی در تعیین میزان فرسایش خاک تعیین اولین سال بیرون‌زدگی ریشه از خاک می‌باشد. در سال‌های اخیر در کنار استفاده از شاخص‌های ماکروسکوپی مانند خروج حلقه‌های رشد از حالت متحدالمرکز، استفاده از شاخص‌های میکروسکوپی است. برای آنالیز میکروسکوپی از شاخص‌هایی نظیر تغییرات اندازه، تعداد و جهت‌گیری آوندها، اندازه لومن سلول‌ها و فیبرها استفاده می‌شود.

در این پژوهش نتایج آنالیز میکروسکوپی نشان از نازک شدن دیواره سلول‌های آوندی و کاهش اندازه لومن سلول‌های فیبر در اثر قرار گرفتن در معرض هوا داشت. نتایج حاکی از آن است که لومن سلول‌ها (فضای درون‌سلولی) بعد از بیرون‌زدگی حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است. محیط و مساحت آوندها نیز بعد از بیرون‌زدگی افزایش داشته است(شکل شماره ۸). در این پژوهش استفاده از شاخص‌های میکروسکوپی کمک شایانی به تشخیص اولین سال بیرون‌زدگی ریشه از خاک کرد.





شکل ۸- مقایسه میانگین محیط و مساحت آوندها در حلقه‌های رشد قبل و بعد از بیرون‌زدگی از خاک

Fig.8. Comparison of Mean Circumference and Area of Vessels in Growth Rings Before and After Emergence from the Soil

۳- نتیجه‌گیری

فرسایش خاک عامل اصلی تخریب زمین است که در بسیاری از اکوسیستم‌های مختلف اثرات قابل‌توجهی را بر جای می‌گذارد. در ایران به دلیل شکننده‌تر بودن اکوسیستم، تخریب و تغییر کاربری‌های طبیعی زمین، فرسایش خاک بسیار گسترده‌تر و اثرات زیست‌محیطی حاصل از آن بسیار حادتر است و جبران و جایگزینی خاک فرسایش یافته به علت نامساعد بودن شرایط اقلیمی بسیار کند و دشوار است (Shirzadi, Hosseinzadeh, Nosrati, & Matesh Beyranvand, 2023) . ایران در حال حاضر با مشکلات زیادی در رابطه با فرسایش خاک مواجه است، بخش وسیعی از اراضی کشور را محیط‌های آسیب‌پذیر به خطر بیابانی شدن احاطه کرده‌اند، به‌طوری‌که ۷۵ درصد اراضی ایران در معرض فرسایش قرار دارد(Sepehr,2014) . در پژوهش حاضر، با هدف تعیین میزان فرسایش ورقه‌ای در حوضه آبریز دربادام در شهرستان قوچان از تکنیک درندروژئومورفولوژی استفاده شده است.

مقایسه سن درختان و میزان فرسایش سالیانه برآورد شده از هر نمونه، نشان از یک رابطه خطی معکوس دارد. در واقع با کاهش سن نمونه‌ها میزان فرسایش افزایش یافته است. Pazhouhandeh, Bayramzadeh,

Safdari & Zarrinkafsh, (2014) با استفاده از روش دندروژئومورفولوژی نرخ فرسایش را در حوزه حسن‌آباد چالوس محاسبه کرده‌اند که نتایج پژوهش آن‌ها نیز نشان داد که با کاهش سن نمونه‌ها میزان فرسایش افزایش یافته است. خاک اطراف ریشه درختان جوان‌تر نسبت به خاک محدوده درختان مسن‌تر نسبت به فرسایش حساس‌تر است. ریشه درختان جوان‌تر در سطح بالاتری از خاک قرار گرفته است و در اثر هدررفت خاک زودتر در معرض هوای آزاد قرار می‌گیرند. Bahrami et al.,(2011)، نیز با بررسی فرسایش سالانه در حوضه قره چای به این نتیجه دست یافتند که درختان با سن کم‌تر از ۵۰ سال، فرسایشی معادل ۰/۸۶ میلی‌متر و درختان دارای سن بیش از ۲۵۰ سال فرسایشی حدود ۰/۲۵ میلی‌متر را در سال دارند. افزایش فرسایش می‌تواند نتیجه فعالیت‌های انسانی شامل تغییر کاربری اراضی، تخریب پوشش گیاهی و چرای بی‌رویه دام دانست. این تغییرات منجر به افزایش فشار بر منابع طبیعی و افزایش روند فرسایشی خواهد بود بی‌شک تلاش در حفظ درختان منطقه و جلوگیری از و تغییر کاربری اراضی جنگلی تخریب پوشش درختی، سبب کاهش روند فرسایش خاک در منطقه موردمطالعه خواهد شد.

نتایج نشان داد در مطالعه موردمطالعه شیب محل نمونه‌برداری‌ها با نرخ فرسایش سالانه یک رابطه خطی مستقیم داشت. مطالعات متعدد نیز نشان داده است فرسایش با درصد شیب ارتباط تنگاتنگی دارد. هر شیب افزایش یابد رواناب سرعت بیش‌تری ا خواهد داشت در نتیجه قدرت تخریب آن بیش‌تر شده و نفوذ کاهش خواهد یافت (Fu, Liu, Liu, & Xu, 2011., Fu et al.,(2011) Jiao, Zou, Jia, & Wang, 2009) با مطالعه اثر شیب بر فرسایش بیان کردند، در شیب‌های تند در صورت فقدان پوشش گیاهی رواناب فرصت کافی برای نفوذ را پیدا نخواهد کرد در نتیجه سرعت بیشتری گرفته و میزان تخریب آن نیز بیشتر خواهد شد.

در منطقه موردمطالعه بیش‌ترین فرسایش سالانه در مناطق با پوشش مرتعی فقیر و کم‌ترین فرسایش سالانه در کاربری جنگل صورت ثبت شد. تراکم بیش‌تر پوشش گیاهی می‌تواند عامل مؤثری در پیش‌گیری از فرسایش ورقه‌ای باشد(Nyssen et al., 2006). تراکم بالای پوشش گیاهی ازجمله عوامل بسیار مهم و تأثیرگذار در پیش‌گیری از فرسایش است(Faulkner, 2013) . پوشش گیاهی متراکم منجر به کاهش تلفات خاک ناشی از برخورد قطرات باران می‌شود، همچنین ساقه گیاهان در مقابل رواناب به‌عنوان کاهنده‌ی سرعت عمل کرده و

نفوذ آب را افزایش می‌دهند(Malik & Wistuba, 2012). ریشه گیاهان نیز با ایجاد منافذ زیاد بستر خاک را برای نفوذ بیش‌تر آماده کرده و منجر به افزایش پایداری در پروفیل خاک خواهند شد. افزایش رطوبت نیز منجر به ازدیاد مواد آلی در خاک شده، در نتیجه ذرات خاک همبستگی بیش‌تر پیدا کرده و در برابر فرسایش مقاوم‌تر خواهند بود (Malik, & Matyja, 2008). Costa, Ferreira, Botosso & Callado, (2015) چرای مداوم را یکی از عوامل اصلی ایجاد فرسایش ورقه‌ای عنوان کردند.

با توجه به اهمیت فوق‌العاده تعیین سال بیرون‌زدگی ریشه از خاک در این مطالعه ضمن به‌کارگیری شاخص‌های ماکروسکوپی نشان‌دهنده بیرون‌زدگی ریشه از خاک که در اکثر مطالعات مورداستفاده قرار می‌گیرند، از شاخص‌های میکروسکوپی نیز در تعیین سال برون‌زد ریشه استفاده شد. در این پژوهش مشخص شد درصد فضای درون‌سلولی (Lomen) بعد از بیرون‌زدگی ریشه از خاک کاهش یافته است. همچنین محیط و مساحت آوندها بعد از برون‌زدگی از خاک افزایش داشت. نتایجی که مشابه آن قبلاً توسط Ballesteros-Cánovas et al.,2013 ارائه شد.

Bodoque et al.,(2011) نیز بیان کردند قرار گرفتن ریشه در معرض هوا موجب تغییر در تعداد و جهت‌گیری سلول‌های آوندی می‌شود. همبستگی‌های متقابل در سری حلقه‌های رشد ریشه‌های در معرض نور و خارج از آن نشانگر وابستگی زیاد رشد حلقه با عوامل اقلیمی غالب هر منطقه است (Chartier, Giantomasi, Renison, & Roig, 2016). دگرگونی رشد یکی از رایج‌ترین و مشهودترین خصوصیات تغییر پس از مواجهه با برون‌زدگی است (Ballesteros-Cánovas et al.,2013; Stoffel,2008). نتایج تحقیق توسط Gärtner,(2007) نشان داد تغییرات آناتومیکی به دلیل برهنه شدن ریشه، ۳۰ میلی‌متر قبل از قرار گرفتن ریشه در معرض هوا رخ می‌دهد. زخم‌های ایجادشده روی ریشه در اثر سایش بافت کامبیوم ایجاد می‌شوند و به‌صورت آناتومیک شناسایی و به‌راحتی تاریخ آن مشخص می‌گردد (Ballesteros-Cánovas et al.,2013).

با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، روش دندروژئومورفولوژی برای تخمین میزان فرسایش در منطقه موردمطالعه روشی دقیق، آسان و کم‌هزینه‌تر از سایر روش‌هاست و می‌توان از این تکنیک برای برآورد

میزان تخریب در منطقه‌ای وسیع استفاده کرد. مطالعه توأم ماکروسکوپی و میکروسکوپی ریشه‌های بیرون‌زده اطلاعات دقیق‌تر و جامع‌تری از روند فرسایش در اختیار ما قرار می‌دهد. با توجه به وضوح حلقه‌های رشد گونه درختی ارس، می‌توان نتیجه گرفت این درخت ارس گونه مناسبی برای استفاده در تکنیک دندروژئومورفولوژی است.

References

Ahmadi, H. (2008). *Applied Geomorphology*. Tehran: University of Tehran. [In Persian]

Bahrami, S., Mahboobi, F., Sadidi, J., & Jafari Aghdam, M. (2011). Estimating the rate of sheet erosion by dendrogeomorphological analysis of tree roots in Gharechai (Ramian) Catchment. *Physical Geography Research*, *43*,18-20. [In Persian] https://jphgr.ut.ac.ir/article_22627.html?lang=en

Bahrami, S., Tazari, A., & Parsiani, K. (2018). Estimating the Lateral and Bed Erosion of Gully by Dendrogeomorphological Analysis of Tree Roots in Nilkooh Catchment (Galikesh), Golestan Province. *Geography and Environmental Planning*, *29*(3), 173-194. [In Persian] https://doi.org/10.22108/gep.2018.98168.0

Ballesteros-Cánovas, J. A., Bodoque, J. M., Lucía, A., Martín-Duque, J. F., Díez-Herrero, A., Ruiz-Villanueva, V., ... & Genova, M. (2013). Dendrogeomorphology in badlands: methods, case studies and prospects. *Catena*, *106*, 113-122. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.009

Bodoque, J. M., Lucía, A., Ballesteros, J. A., Martín-Duque, J. F., Rubiales, J. M., & Genova, M. (2011). Measuring medium-term sheet erosion in gullies from trees: A case study using dendrogeomorphological analysis of exposed pine roots in central Iberia. *Geomorphology*, *134*(3-4), 417-425. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.016

Carrara, P.E., & Carroll, T.R. (1979). The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado. *Earth Surface Processes*, 4(4), 307–317. https://doi.org/10.1002/esp.3290040402

Chartier, M.P., Giantomasi, M.A., Renison, D., & Roig, F.A. (2016). Exposed roots as indicators of geomorphic processes: a case-study from Polylepis mountain woodlands of Central Argentina. *Dendrochronologia*, 37,57–63. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.11.003

Corona, C., Saez, J. L., Rovéra, G., Stoffel, M., Astrade, L., & Berger, F. (2011). High resolution, quantitative reconstruction of erosion rates based on anatomical changes in exposed roots at Draix, Alpes de Haute-Provence—critical review of existing approaches and independent quality control of results. *Geomorphology*, 125(3), 433-444. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.030

Costa, M. S., Ferreira, K. E. B., Botosso, P. C., & Callado, C. H. (2015). Growth analysis of five Leguminosae native tree species from a seasonal semidecidual lowland forest in Brazil. *Dendrochronologia*, 36, 23-32. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.08.004

Domínguez-Castillo, V., Bovi, R.C., Chartier, M.P., Tomazello Filho, M., & Cooper, M. (2020). Using dendrogeomorphology to estimate soil erosion in mixed native species and pine forests

on Ultisols in Piracicaba, Brazil. *Geoderma Regional*, 21, e00276. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00276

Faulkner, H. (2013). Badlands in marl lithologies: a field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies. *Catena*, 106, 42-53. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.04.005

Fayle, D. C. F. (1968). *Radial Growth in Tree Roots: Distribution, Timing, Anatomy*. Toronto: University of Toronto, Faculty of Forestry. https://nla.gov.au/nla.cat-vn222932

Fu, S., Liu, B., Liu, H., & Xu, L. (2011). The effect of slope on interrill erosion at short slopes. *Catena*, 84(1-2), 29-34. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.013

Gärtner, H. (2007). Tree roots - methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. *Geomorphology*, 86(3-4), 243–251. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.001

Gärtner, H., Schweingruber, F.H., & Dikau, R.(2001) Determination of erosion Rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia*, 19, 81–91.

Gyssels, G., Poesen, J., Bochet, E., & Li, Y. (2005). Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in physical geography*, 29(2), 189-217. https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra

Hitz, O.M., Gärtner, H., Heinrich, I., & Monbaron, M. (2008). Application of ash (Fraxinus excelsior L.) roots to determine erosion rates in mountain torrents. *Catena*, 72(2),248–258. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.05.008

Hosseinzadeh, M.M., Matsh Beyranvand, S., Esmaili, R. (2020). Analysis of channel bank erosion rate using exposed roots of trees: a case study of lavij stream, northern Alborz Mountains, Iran. *Journal of Mountain Science*, 17(5),1096-1105. https://doi.org/10.1007/s11629-019-5558-9

Jiao, J., Zou, H., Jia, Y., & Wang, N. (2009). Research progress on the effects of soil erosion on vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 29(2), 85-91. https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2009.05.001

Karimi, S., Rajabi, M., & Rezaei Moghaddam, M. H. (2021). Evaluation and zoning of soil erosion in karst areas by SMLRK Model (case study of Alvand basin of Kermanshah province). *Journal of Geography and Planning*, *24*(74), 197-214. [In Persian] https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_10861_en.html

Lal, R. (2009). Laws of sustainable soil management. *Sustainable agriculture*,9-12. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_2

Lal, R.A.T.T.A.N. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(16). 519–539. https://doi.org/10.1002/ldr.472

LaMarche, V.C. (1968). *Rates of slope degradation as determined from botanical evidence,White Mountains. California*. Washington: United States Government Printing Office.

Lawler, D.M. (2005). The importance of high-resolution monitoring in erosion and deposition dynamics studies: examples from estuarine and fluvial systems. *Geomorphology*, 64(1-2),1–23. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.04.005

Malik, I., & Matyja, M. (2008). Bank erosion history of a mountain stream determined by means of anatomical changes in exposed tree roots over the last 100 years (Bílá Opava River—Czech Republic). *Geomorphology*, 98(1-2), 126-142.

https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.030

Malik, I., & Wistuba, M. (2012). Dendrochronological methods for reconstructing mass movements-An example of landslide activity analysis using tree-ring eccentricity. *Geochronometria*, 39, 180-196. https://doi.org/10.2478/s13386-012-0005-5

Nyssen, J., Poesen, J., Veyret-Picot, M., Moeyersons, J., Haile, M., Deckers, J., ... & Govers, G. (2006). Assessment of gully erosion rates through interviews and measurements: a case study from Northern Ethiopia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(2), 167-185. https://doi.org/10.1002/esp.1317

Paknejad, F., Hoseinzadeh, S., & jahadi toroghi, M. (2018). Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity using dendrogeomorphological methods in the Tangrah Catchment. *Quantitative Geomorphological Research*, *7*(2), 1-18. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1397.7.2.1.7

Pazhouhandeh, A., Bayramzadeh, V., Safdari, V., & Zarrinkafsh, M. (2014). The Applicability of the Exposed Roots of Cupressus sempervirens L. var horizontalis for the Estimation of Soil Erosion in Hassan Abad, Mazandaran Province. *Forest and Wood Products*, *67*(3), 411-421. [In Persian]. https://doi.org/10.22059/jfwp.2014.52087

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., … & Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201),1117–1123. https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117

Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes Landforms*, 43(1),64–84. https://doi.org/10.1002/esp.4250

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), 91–113. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1

Procter, E., Stoffel, M., Schneuwly-Bollschweiler, M., & Neumann, M. (2012). Exploring debris-flow history and process dynamics using an integrative approach on a dolomitic cone in western Austria. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(9), 913–922. https://doi.org/10.1002/esp.3207

Reid, L.M., Dewey, N.J., Lisle, T.E., & Hilton, S. (2010). The incidence and role of gullies after logging in a coastal redwood forest. *Geomorphology*, 117(1-2), 155–169. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.025

Sepehr, A. (2014). Bistability and Catastrophic Collapse: Thermodynamics Analysis of Desertification. *Geography and Environmental Planning*, *25*(2), 119-132. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085362.1393.25.2.10.4

Shirzadi, L., Hosseinzadeh, M. M., Nosrati, K., & Matesh Beyranvand, S. (2023). Surface Erosion Estimation through Dendrogeomorphological Analysis and Investigating the Role of Land-use and Slope Direction on Erosion in Nachi Catchment. *Sustainable Development of Geographical Environment*, *4*(7), 158-172. [In Persian] https://egsdejournal.sbu.ac.ir/article_103132_en.html?lang=en

Smith, H.G. (2008). Estimation of suspended sediment loads and delivery in an incised upland headwater catchment, south-eastern Australia. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(16), 3135–3148. https://doi.org/10.1002/hyp.6898

Stoffel, M. (2008). Dating past geomorphic processes with tangential rows of traumatic resin ducts. *Dendrochronologia*, 26(1), 53–60. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2007.06.002

Stoffel, M., Luckman, B.H., Butler, D.R., & Bollschweiler, M. (2013). 12.9 Dendrogeomorphology: Dating Earth-Surface Processes with Tree Rings. *Treatise on Geomorphology*,12,125-144. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374739-6.00326-2

Stottes, S., O'Neal, M., Pizzuto, J., & Hupp, C. (2014). Exposed tree root analysis as a dendrogeomorphic approach to estimating bank retreat at the South River, Virginia. *Geomorphology*, 223, 10-18. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.06.012

Valentin, C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63(2-3), 132–153. https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001

Verachtert, E., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., & Deckers, J. (2013). Spatial interaction between collapsed pipes and landslides in hilly regions with loess-derived soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8), 826-835. https://doi.org/10.1002/esp.3325